

국내외 판내부 지진기록을 이용한 한국 표준수직설계스펙트럼의 개발

Development of Korean Standard Vertical Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records

김재관¹⁾ · 김정환²⁾ · 이진호³⁾ · 허태민^{1)*}

Kim, Jae Kwan¹⁾ · Kim, Jung Han²⁾ · Lee, Jin Ho³⁾ · Heo, Tae Min^{1)*}

¹⁾서울대학교 건설환경공학부, ²⁾한국원자력연구원 종합안전평가부, ³⁾부경대학교 해양공학과

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, ²⁾Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ³⁾Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

/ A B S T R A C T /

The vertical design spectrum for Korea, which is known to belong to an intra-plate region, is developed from the ground motion records of the earthquakes occurred in Korea and overseas intra-plate regions. From the statistical analysis of the vertical response spectra, a mean plus one standard deviation spectrum in lognormal distribution is obtained. Regression analysis is performed on this curve to determine the shape of spectrum including transition periods. The developed design spectrum is valid for the estimation both spectral acceleration and displacement. The ratio of vertical to horizontal response spectrum for each record is calculated. Statistical analysis of the ratios rendered the vertical to horizontal ratio (V/H ratio). Subsequently the ratio between the peak vertical ground acceleration to the horizontal one is obtained.

Key words: Korea, Vertical design spectrum, Intra-plate earthquake, V/H ratio, Vertical ground motion

1. 서론

지진원에서 만들어진 지진파가 전파하면 지반이 진동하게 된다. 어떤 특정 관측점에서의 지반운동은 직교하는 수평 2축 방향 성분과 수직 방향 성분을 갖고 있다. 그러므로 내진설계에서는 원칙적으로 이 3가지 병진 운동 성분에 의한 영향을 고려해야 한다. 우리나라는 그동안 1997년에 발간된 “내진설계기준연구” 보고서에 제시된 수평 지반운동에 대한 스펙트럼을 설계스펙트럼으로 사용했다[1]. 그리고 수직 지반운동을 고려해야 할 경우에는 수평설계스펙트럼을 2/3배로 줄여서 사용하도록 권고하고 있다. 이것은 수직 지반운동의 스펙트럼이 수평스펙트럼과 같고 단지 수직 지반가속도만 차이가 있다는 것을 전제한다. 도로교 설계기준 케이블교량편에서는 (1) 수직 지반운동 PGA를 수평 지반운동 PGA의 1/2~2/3으로 취할 수 있고 (2) 수직설계스펙트럼의 형상을 수평설계스펙트럼과 같게 취할 수 있도록 허용하고 있다[2]. 그러나 실제 지진기록에서는 수직 지반운동은 수평

지반운동과 세기에서 차이가 있을 뿐 아니라 스펙트럼 형상에도 차이가 있다. USNRC는 원자력 시설의 내진설계에서 수직 지반운동을 고려하도록 규정하고 있고 수직설계스펙트럼을 별도로 제시하고 있다[3]. Eurocode [4]와 최근에는 NEHRP[5]에서도 수직 설계스펙트럼을 별도로 제시하고 있다. 이러한 세계적 추세에 비추어 보면 우리나라도 수직설계스펙트럼을 별도로 규정할 필요가 있다.

우리나라의 설계지진하중은 우리나라에서 발생한 지진의 기록을 사용하여 구하는 것이 가장 이상적일 것이다. 그러나 우리나라는 큰 지진이 자주 발생하지 않고 지진계로 관측을 시작한 시간도 오래되지 않았다. 최근 기상청이 지진관측망을 확대 구축하는 사업을 추진하여 최근에 발생한 지진의 기록은 많아지고 있지만 강진 기록의 수는 여전히 제한적이다. 우리나라 지진학자들은 우리나라에서 예상되는 최대지진의 크기를 규모 6.8로 추정하고 있다. 강진국가에서 지진위험도 해석과 설계스펙트럼 도출에는 일반적으로 규모 5 이상의 지진에 의한 기록이 사용되고 있다. 말하자면 고려하는 지진 크기의 하한이 규모 5인 것이다[6]. 그 이유는 규모 5 이하의 지진에 대해서는 유의미한 구조적 피해가 거의 발생하지 않기 때문이다[7]. 그러나 규모의 하한을 5.0으로 정하면 스펙트럼을 구하는 데 사용될 수 있는 우리

*Corresponding author: Heo, Tae Min

E-mail: intm2314@snu.ac.kr

(Received September 7, 2016; Revised October 14, 2016; Accepted October 14, 2016)

나라에서 발생한 지진의 수는 극히 적다. 그리고 규모 5이하의 지진에 의해서 경미한 피해가 발생할 가능성이 있다. 그런데 USGS의 자료에 따르면 규모 4.5 이하의 지진에 의해서는 지진 피해가 거의 발생하지 않는다고 한다. 그래서 이 연구에서는 고려하는 지진의 크기의 하한을 규모 4.5로 결정하였다. 그러므로 우리나라 설계스펙트럼을 구하기 위해서 규모가 4.5에서 7 정도인 우리나라에서 발생한 지진의 기록이 필요하였다.

우리나라에서 기록된 최대지진은 규모 5.2로 평가되는 울진지진이다.¹⁾ 만약 우리나라 지진기록만 사용한다면 규모 5.2에서 규모 7까지 범위의 지진에 대한 데이터가 없다. 심각한 피해는 주로 이 범위에 속하는 지진에 의해서 발생하는 것을 감안할 때 다른 대안을 사용해서 필요한 정보를 확보할 필요가 있다. 가능한 방법으로는 참고문헌[8]에서 서술한 바와 같은 경험적 그린함수법(Empirical Green's Function method, EGF)[9-15], 추계학적 방법 등이 있다[16-20], 그리고 우리나라와 지진환경이 유사한 해외 판내부지역에서 발생한 지진 기록을 활용하는 방법이 사용될 수 있을 것이다.

수직설계스펙트럼은 실제 수직지반운동 기록으로부터 도출할 필요가 있다. 추계학적 방법에 따르면 수평지반운동과 수직지반운동의 스펙트럼이 같게 얻어진다. EGF 방법은 실제 적용하였을 때 장주기 영역에서 오차가 확대되는 문제가 있다는 것을 발견하였다. 이 문제에 대해서는 별도의 논문에서 보고할 계획이다. 이러한 문제 때문에 또 수평설계스펙트럼과 도출방법에 일관성이 있어야 하기 때문에 이 연구에서는 최종적으로 국내의 판내부 지진 기록을 사용하여 수직설계스펙트럼을 구하는 방안을 채택하였다.

수직하중을 규정할 때 수직스펙트럼만으로는 충분하지 않다. 수평스펙트럼에 대한 수직스펙트럼의 비에 대한 정보가 필요하다. 최소한 최대수평지반가속도에 대한 최대수직지반가속도의 비가 제공되어야 한다. 이 연구에서는 각 지진기록마다 기하평균스펙트럼으로 정의한 수평스펙트럼과 수직스펙트럼을 계산하고 그 비를 구하였다. 이 비의 중앙값을 계산하고 주기 0.01초에서 값을 최대수평지반가속도에 대한 최대수직지반가속도의 비로 정의하였다.

판내부 지진 기록은 구하기가 쉽지 않았다. 관측 기록 중에서 암반이나 단단한 지반에서 관측된 지진 기록은 더욱 수 제한적이었다. 그러나 한정된 개수의 기록으로 분석하였지만 통계적으로 유의한 결과가 얻어졌다. 이 결과를 우리나라 설계스펙트럼으로 채택하는 것은 관계 전문가들이 의견을 수렴해서 결정할 사안이라고 생각된다.

연구를 수행하면서 고무적인 사항과 개선되어야 할 사항들을 인지하게 되었다. 기상청이 지진관측망을 잘 구축하였기 때문에 비록 규모는 작지만 좋은 지진기록을 확보할 수 있었다. 그런데 국외 판내부 지진 기록을 구하는 문제는 앞으로 지속적으로 노력해야 할 사항이라고 생각된다.

2. 수직설계스펙트럼에 관한 외국 기준

2.1 미국 원자력 시설의 설계 기준에서의 관련 규정

USNRC Reg. Guide 1.6[3]에는 수직설계스펙트럼이 수평설계스펙트

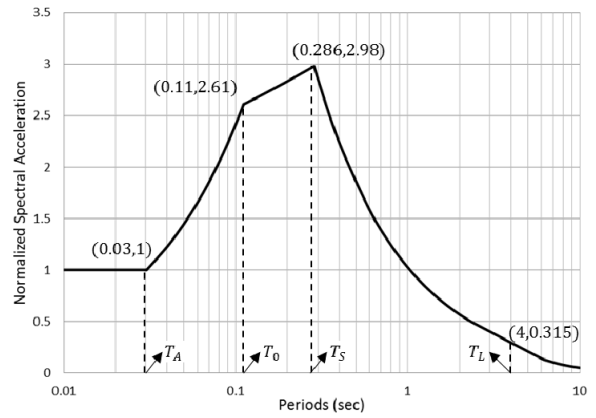


Fig. 1. Vertical design spectrum in USNRC Regulation Guide 1.6[3]

럼과는 별도로 제시되어 있다. 3.5 Hz 이상의 단주기 영역에서는 수직설계스펙트럼은 수평설계스펙트럼의 값과 같아지고, 2.5 Hz 이하의 장주기 영역에서는 수직설계스펙트럼은 수평설계스펙트럼의 2/3로 그 값이 주어진다. 말하자면 V/H 비를 단주기 영역에서는 1, 장주기 영역에서는 2/3로 규정하고 있다. 가속도에 민감한 구간인 $T_0 \leq T \leq T_S$ 에서 증폭계수는 2.61부터 2.98까지 변동한다.

미국 ASCE의 4-98[21]의 규정도 Reg. Guide 1.6과 유사하다. 설계 지반운동이 원거리 지진에 의해서 발생한다면 수직설계스펙트럼은 전체 주기 영역에서 수평설계스펙트럼의 2/3로 취하도록 규정하고 있다. 그런데 만약 가까운 거리에서 발생한 지진에 의해서 설계 지반운동이 발생한다면 5 Hz 이상의 (0.2초 이하의) 단주기 영역에서는 수평설계스펙트럼과 같은 값을 취하고 3 Hz 이하의 (0.33초 이상의) 장주기 영역에는 수평설계스펙트럼의 2/3로 그 값을 취하도록 규정하고 있으며 5 Hz와 3 Hz 사이에서는 그 값이 1에서 2/3로 변동하도록 규정하고 있다.

2.2 미국 NEHRP(2009)[5]에서의 규정

미국 NEHRP에서 제시한 수직설계스펙트럼은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 S_{DS} 는 가속도에 민감한 구간의 수평설계스펙트럼으로부터 정의되는데 이 값은 지반의 영향이 반영되어 있다. 그리고 C_v 는 vertical coefficient로 정의되는 값이며 다음 Table 1에 주어져 있다.

$S_S = 0.5$ 이고 표준 지반인 S_B 의 경우에는 $C_v = 0.9$ 로 주어진다. 수직가속도스펙트럼의 최대값은 $SA = 0.8C_v S_{DS}$ 이고 ZPA(Zero Period Acceleration) 즉, 최대수직지반가속도는 $PGA_v = 0.3C_v S_{DS}$ 로 주어진다. 따라서 최대수직지반가속도에 대한 최대가속도스펙트럼의 비는 $0.8/0.3 = 2.67$ 로 계산되면 수평설계스펙트럼에서의 비인 2.5에 비하여 조금 큰 값을 갖는다. 최대수평지반가속도 PGA_h 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$PGA_h = \frac{1}{2.5} S_{DS} = 0.4 S_{DS} \tag{1}$$

그러면 여기서 우리는 최대수직지반가속도 PGA_v 와 최대수평지반가속도 PGA_h 의 비를 추정할 수 있다.

1) 본 논문의 게재가 확정된 다음인 2016년 9월 12일에 규모 5.8의 경주지진이 발생하였다. 따라서 이 논문에서 제시한 설계스펙트럼은 경주지진의 기록을 사용하지 않고서 얻어진 것이다.

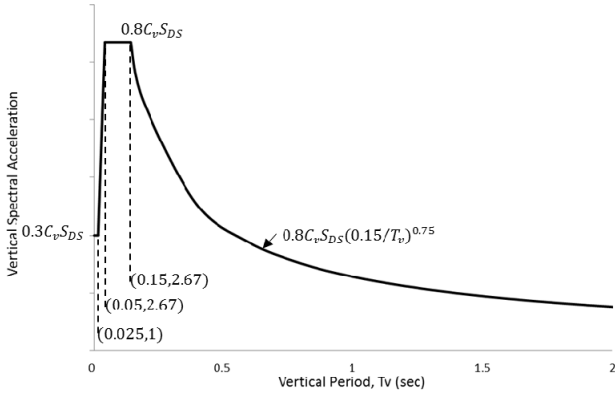


Fig. 2. Vertical design spectrum in NEHRP[5]

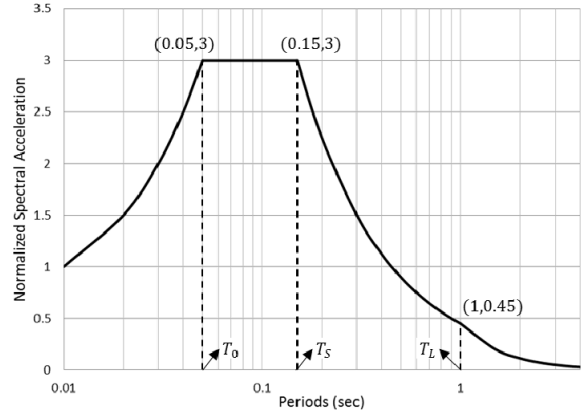


Fig. 3. Vertical design spectrum in Eurocode 8[4]

Table 1. Values of vertical coefficient C_v

MCE Spectral Response parameter at Short Periods	Site Class A, B	Site Class C	Site Class D, E, F
$S_S \geq 2.0$	0.9	1.3	1.5
$S_S = 1.0$	0.9	1.1	1.3
$S_S = 0.6$	0.9	1.0	1.1
$S_S = 0.3$	0.8	0.8	0.9
$S_S \leq 0.3$	0.7	0.7	0.7

$$\frac{PGA_v}{PGA_h} = \frac{0.3C_vS_{DS}}{0.4S_{DS}} = \frac{0.3 \times 0.9}{0.4} = 0.675 \quad (2)$$

수직설계스펙트럼은 주기 $T \geq 0.15$ 초 이상에서는 $T^{0.75}$ 에 반비례하여 감소하며 $T \geq 2$ 초 이상인 장주기 영역에서는 수평설계스펙트럼의 1/2로 취할 수 있다. 그런데 주기가 $0.05 \leq T \leq 0.15$ 초인 구간에서는 수평설계스펙트럼에 대한 수직설계스펙트럼의 비는 $0.8 \times 0.9 = 0.7$ 이다.

이 결과는 비록 원자력 시설의 결과와 차이는 있지만 전체적으로 수직설계스펙트럼의 주기에 따른 변동은 같은 경향을 갖고 있다고 서술하고 있다.

2.3 Eurocode 8[4]에서의 규정

앞서 언급하였듯이 Eurocode 8은 수직설계스펙트럼을 명확하게 별도로 제시하고 있다. 수평설계스펙트럼과는 달리 설계지진규모에 무관하게 Fig. 3에 묘사된 하나의 설계스펙트럼이 사용된다.

Eurocode 8에서는 최대수직지반가속도 PGA_v 의 최대수평지반가속도 PGA_h 에 대한 비를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\frac{PGA_v}{PGA_h} = 0.9, \quad \text{지진 규모 } M \geq 5.5 \quad (3)$$

또는

$$\frac{PGA_v}{PGA_h} = 0.45, \quad \text{지진 규모 } M < 5.5. \quad (4)$$

설계스펙트럼의 전이 주기 $T_B(T_0)$, $T_C(T_S)$, $T_D(T_L)$ 는 다음과 같이 규정되고 있다.

$T_B = 0.05$ 초, $T_C = 0.15$ 초, $T_D = 1.0$ 초 가속도설계스펙트럼은 $T_B \leq T \leq T_C$ 에 일정하고 수직 지반 가속도에 대한 증폭 비율은 3η 로 주어지는데 이때 η 는 감쇠비에 따라서 결정되는 parameter이다. 감쇠비 $\xi = 5\%$ 이면 $\eta = 1.0$ 로 주어진다. 그러므로 증폭 비율은 3이 된다. $T_C \leq T \leq T_D$ 구간에서 가속도설계스펙트럼은 $1/T$ 에 비례하여 감소하고 변위에 민감한 $T > T_D$ 구간에서는 $1/T^2$ 에 비례하여 감소한다.

3. 지진 목록과 분류

분석에는 총 16개 지진에 의해 진앙거리 200 km 이하의 관측소에 관측된 49개 지진기록이 사용되었다. 그 중에서 국내 지진 기록은 5개 지진에서 관측된 24개 기록으로 구성되어있고 국외의 지진 기록은 11개 지진에서 관측된 25개 기록으로 구성되어있다. 참고문헌[8]의 수평지진기록의 개수보다 적는데 그 이유는 외국의 2개 지진의 경우 수평 기록만 있고 수직성분의 기록은 없기 때문이다. 규모 4.5 이상인 국내 지진의 개수는 더 많다. 그러나 진앙거리가 200 km 이하이고 암반에서 관측된 기록으로 제한하면 5개 지진으로 줄어든다[22].

Table 2에 국내 지진 기록을 수록하였다. 이 지진기록의 규모와 거리에 따른 히스토그램을 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 각각 제시하였다. 지진 기록은 모두 규모 5.0 근처에 모여 있는 것을 알 수 있다.

국외 지진 기록은 Table 3에 수록하였다. 이 지진기록의 규모와 거리에 따른 히스토그램을 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 각각 제시하였다. 국내 기록에 비해서 비교적 규모가 큰 지진에 의한 기록이 많고 규모가 넓은 범위에 펼쳐져 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

국외 지진기록의 지역별 분포를 Fig. 6에 정리하였다. 지진은 대부분 북미 대륙과 유럽, 이란 그리고 인도에서 발생한 것을 알 수 있다. 아직 이 목록으로는 세계 전체의 판내부지역을 망라하지는 못하고 있다는 것을 또한 인지할 수 있다.

국내, 국외 지진 기록을 합친 기록의 규모와 거리에 따른 분포를 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 히스토그램으로 나타냈다.

비록 규모 5 근처 기록이 상대적으로 많지만 규모 6 이상의 지진 기록도

Table 2. List of domestic earthquake records[22]

Name	YEAR	MD	HR/MN	Magnitude	EpiD(km)	Station name
Hong island Earthquake	2003	0322	2038	4.9	85.44	HUK
					164.15	MOP
Offshore Uljin Earthquake	2004	0529	1914	5.2	199.20	BUS
					199.10	CHJ
					164.44	DAG
					168.22	DGY
					7.52	DGY
Odaesan Earthquake	2007	0120	2056	4.8	144.77	BON
					152.31	CEA
					69.37	CHC
					105.43	CHJ
					104.51	CWO
					112.72	ICN
					162.69	MUS
					180.14	PHA
					149.48	SEO
					68.39	SKC
					149.31	SWO
					70.07	TBA
					56.75	WJU
Offshore Sinan Earthquake	2013	0420	2321	4.9	187.02	GBI
Seogyongnyeolbi island Earthquake	2014	0401	0448	5.1	101.48	GBI
					147.00	DEI
					116.29	BAR

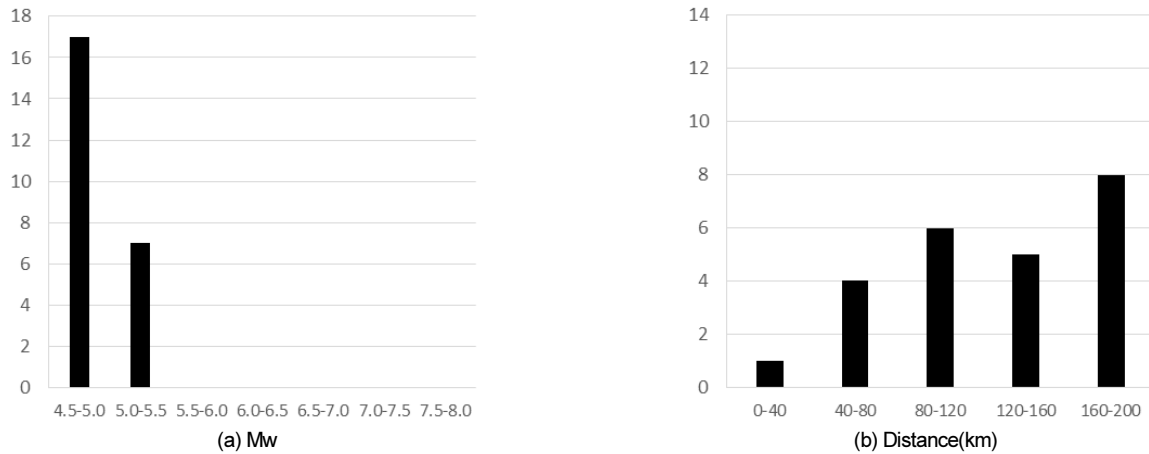


Fig. 4. Distribution of domestic earthquake records: (a) Frequency histogram w.r.t. magnitude, (b) Frequency histogram w.r.t. distance

상당수 포함되어 있어서 전체적으로 균형을 맞추어주고 있다. 거리에 따라서는 비교적 고른 분포를 보이고 있다.

4. 분석 방법과 절차

4.1 V/H 비 계산

한 관측점에서의 지진기록은 직교하는 수평 두 축 방향으로의 2개의 가

속도 성분과 하나의 수직 방향 가속도 성분으로 구성된다. V/H 비를 계산하기 위해서 주기 T에서 수평스펙트럼과 수직스펙트럼이 필요하다. 수평스펙트럼은 기하평균스펙트럼인 GMRot150으로 정의하였다[8]. 수직스펙트럼을 계산한 다음 그 값을 수평스펙트럼의 값으로 나누면 V/H 비가 얻어진다. 즉, 한 관측점에서의 기록으로부터 하나의 V/H 비의 곡선이 얻어진다. 같은 계산을 모든 지진기록에 대해서 실시한다. 그 결과로 우리는 49개 곡선을 얻게 된다. 각 주기마다 이 49개 곡선의 중앙값을 계산하면 우리는 V/H 비 중앙값 곡선을 얻게 된다. V/H 비는 주기에 따라서 변동한다.

Table 3. List of overseas intra-plate earthquake records

Location	Name	YEAR	M/D	HR/MN	Magnitude	EpiD(km)	Station name	
America	Borah Peak, ID-01	1983	1028	1406	6.88	108.10	ANL-768 Power Plant	
						86.15	TRA-642 ETR Reactor Bldg	
	Nahanni, Canada	1985	1223			6.80	Site 1	
						22.36	Site 3	
	Saguenay, Canada	1988				5.9	Quebec	
						154.92	Quebec	
						37.77	Chicoutimi-Nord	
						62.31	St-Andre-du-Lac-St-Jean	
	Denali, Alaska	2002	1103			7.9	Carlo (temp)	
						61.85	R109 (temp)	
Mineral, Virginia	2011	0823			5.8	53.80	CVA	
Europe	Roermond, Netherlands	1992	0413	0120	5.3	82.71	OLF	
						103.49	WBS	
Iran	Gazli, USSR	1976	0517		6.8	12.82	Karakyr	
	Tabas, Iran	1978	0916		7.35	20.63	Dayhook	
						55.24	Tabas	
	Manjil, Iran	1990	0620			7.37	40.43	Abbar
	Zarand, Iran	2005	0222	0225	6.4	19.66	Chatrood	
						95.85	Bardsir	
						94.24	Sirch	
						53.28	Deh-Loulou	
						23.62	Qadrooni Dam	
22.98						Shirinrood Dam		
Koynanagar, India	1967				6.5	10.80	KNI	

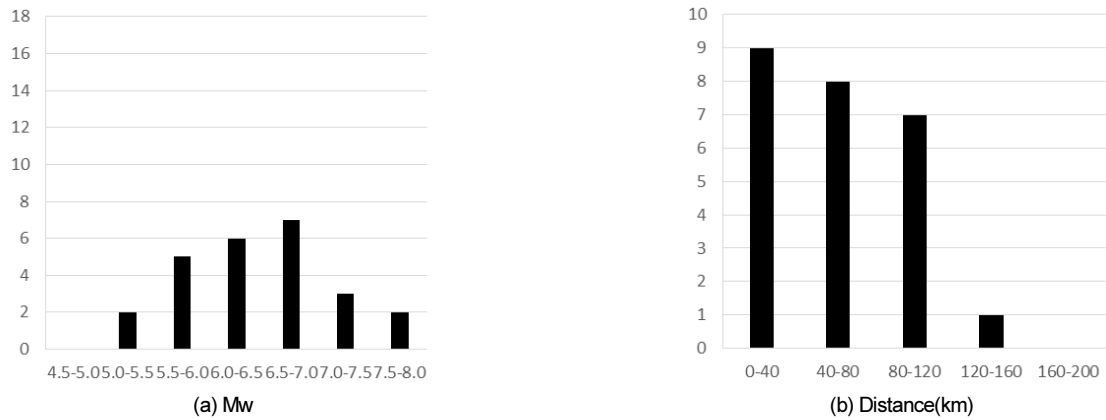


Fig. 5. Distribution of overseas intra-plate earthquake records: (a) Frequency histogram w.r.t. magnitude, (b) Frequency histogram w.r.t. distance



Fig. 6. Regional distribution of overseas intra-plate earthquake records

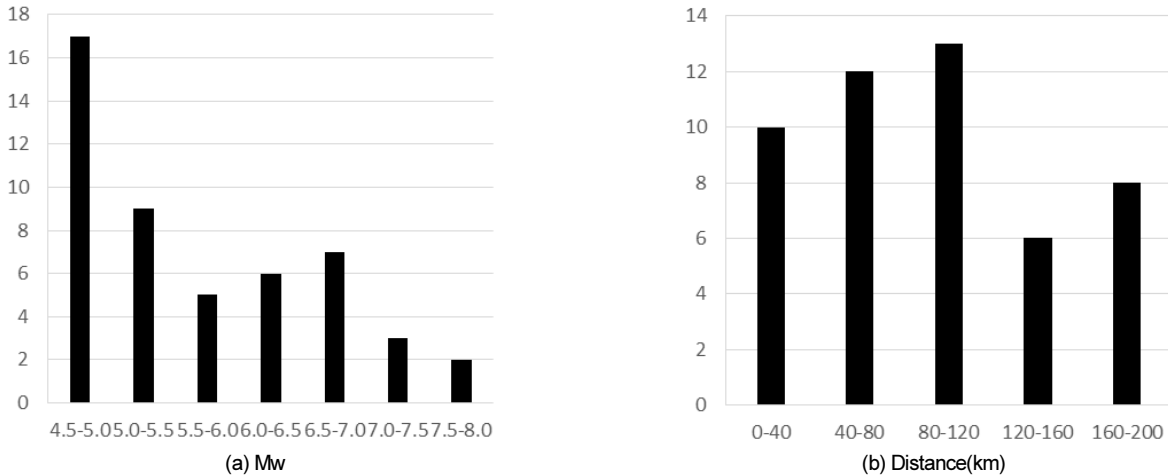


Fig. 7. Distribution of domestic and overseas intra-plate earthquake records: (a) Frequency histogram w.r.t. magnitude, (b) Frequency histogram w.r.t. distance

설계지진의 세기는 최대수평지반가속도로 정의되고 있다. 그러므로 수직 지진하중을 완전하게 정의하기 위해서는 서론에서 언급하였듯이 최대수평지반가속도에 대한 최대수직지반가속도의 비가 주어져야 한다. 이 연구에서는 그 비를 주기 $T = 0.01$ 초에서 스펙트럼의 비 즉 V/H 비로 정의하였다.

4.2 수직설계스펙트럼을 구하기 위한 통계분석

V/H 비를 구하기 위해서 계산된 수직스펙트럼을 $T = 0.01$ sec, 즉 100 Hz에서 가속도스펙트럼 값이 1.0 g가 되도록 정규화하였다. 여기서 g는 중력가속도를 의미한다. 이렇게 하여 주어진 감쇠비에 대해서 각 관측점에서 하나의 정규화된 스펙트럼 곡선이 얻어진다. 모든 관측점에서 수직스펙트럼을 구하면 우리는 일련의 스펙트럼 곡선을 얻게 된다. 개별 스펙트럼 곡선은 주기에 대해서 들쭉날쭉한 모양을 갖고 특정 주기에서는 일련의 스펙트럼 값은 어떤 확률 분포를 갖게 된다. 응답스펙트럼은 대수정규분포를 갖는 것으로 알려져 있다[23]. 대수정규분포의 특성은 평균 mean과 분포의 폭 파라미터인 표준편차 σ 에 의해서 서술될 수 있다. 원하는 신뢰도에서 스펙트럼은 $mean + t\sigma$ 형태로 정의될 수 있다. 여기서 t 는 표준편차의 배수를 의미하고 그 값은 신뢰도에 따라서 결정될 수 있다. 각 주기별로 $mean + t\sigma$ 에 해당되는 값을 연결하면 $mean + t\sigma$ 이 얻어진다. 만약 $t = 0$ 이면 초과 확률이 50%인 평균스펙트럼이 얻어지고 $t = 1$ 이면 초과 확률이 약 16%인 $mean + 1.0\sigma$ 스펙트럼이 얻어진다.

원하는 신뢰도 수준에 따라서 t 의 값을 결정하면 해당하는 스펙트럼 곡선을 얻을 수 있다. 이 곡선은 개별 지진 기록의 스펙트럼보다는 매끈하지만 설계스펙트럼으로 가공하기 위해서는 회귀분석이 필요하다. Fig. 1, 2, 3에 예시한 세계 여러 나라 설계기준에서 채택하는 가속도설계스펙트럼은 대체로 Fig. 8에 예시한 조각적 연속함수의 형태로 주어진다.

Fig. 8의 설계스펙트럼은 4개의 구간으로 구분된다. 각 구간의 절점주기 혹은 전이주기는 T_0, T_S, T_L 을 경계로 구분된다. 원점은 $T = 0.01$ 초를 나타낸다. 이 주기에서 가속도스펙트럼은 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)와 같아진다. 그런데 어떤 지진 기록에서는 가속도스

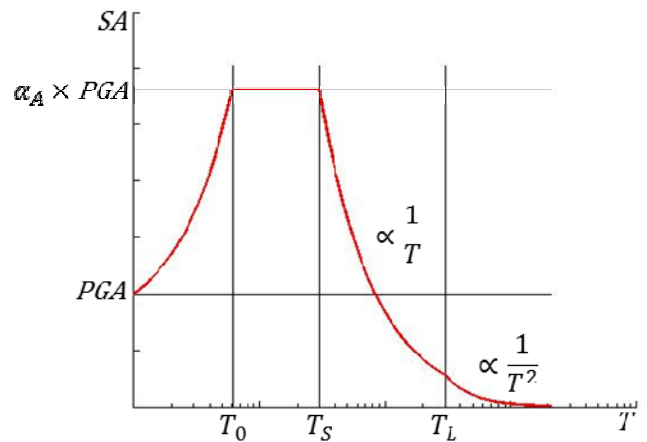


Fig. 8. The shape of a typical acceleration design spectrum

펙트럼이 PGA와 같아지는 주기 T_2 가 0.01 초보다 더 길 수 있다. T_0 는 가속도스펙트럼이 평탄한 구간이 시작되는 주기, T_S 는 가속도에 민감한 구간과 속도에 민감한 구간의 전이주기, T_L 은 속도에 민감한 구간과 변위에 민감한 구간의 전이주기이다. 설계스펙트럼의 형상을 결정하기 위해서는 각 구간에서 곡선의 함수 형태가 미리 정해져야 한다. 설계스펙트럼 곡선은 원점에서 T_0 까지 구간에서는 직선으로 증가하고, T_0 에서 T_S 까지 구간에서는 수평 직선, T_S 에서 T_L 까지 속도에 민감한 구간에서는 $1/T$ 에 비례하여 감소하는 곡선, T_L 이상에서는 $1/T^2$ 비례하여 감소하는 곡선의 형상을 갖는 것으로 알려져 있다. 최종적으로 가속도가 평탄한 구간에서 가속도스펙트럼의 최대지반가속도(PGA)에 대한 비인 증폭계수 α_A 를 알아야 한다.

증폭계수 α_A 와 전이주기 T_0, T_S, T_L 은 통계분석 결과로 얻은 $mean + t\sigma$ 가속도스펙트럼 곡선에 회귀분석을 실시해서 구할 수 있다. 그런데 장주기 영역에서 가속도스펙트럼의 값은 작아진다. 따라서 T_L 이 정확하게 식별되지 않을 우려가 있다. 그러나 변위스펙트럼에서는 장주기 영역에서 곡선의 변화가 더 분명하게 드러날 수 있다. 변위스펙트럼 SD와 가속도스펙트럼 SA의 관계는 다음과 같다.

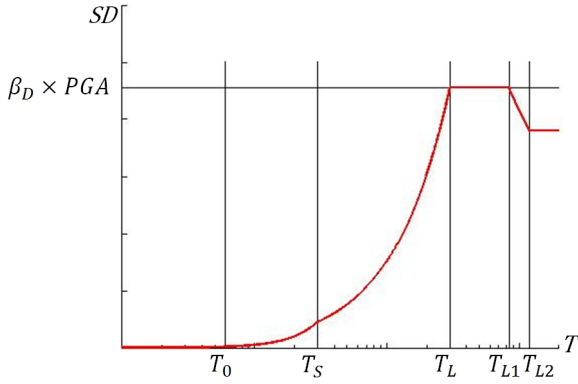


Fig. 9. The shape of a typical displacement design spectrum

$$SD(\omega) = \frac{SA(\omega)}{\omega^2} = \frac{T^2}{4\pi^2} SA(\omega) \quad (5)$$

이 식에 따르면 SD는 속도에 민감한 구간에서는 주기 T에 비례하여 직선적으로 증가하고 변위에 민감한 구간에서는 일정한 상수이다. 변위스펙트럼의 전형적인 형상을 Fig. 9에 예시하였다. 변위스펙트럼은 $T \geq T_L$ 구간에서 일정한 값을 유지하다가 다시 감소하고 T가 계속 길어지면 다시 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 이 두 가지 전이주기를 T_{L1} , T_{L2} 로 명명하기로 하자. 만약 변위설계스펙트럼을 별도로 제시해야 한다면 전이주기 T_{L1} , T_{L2} 도 식별되어야 할 필요가 있다. T_L 은 변위스펙트럼에서 더 명확하게 식별될 수 있다는 것을 Fig. 9는 보여준다.

이 연구에서 T_L , T_{L1} , T_{L2} 은 변위스펙트럼에서 식별하고, T_L 이 고정된 조건에서 가속도스펙트럼으로부터 증폭계수 α_A 와 전이주기 T_0 , T_S 를 식별하는 방안을 채택하였다. 그리고 회귀분석에서 제곱근제곱합(SRSS) 오차를 최소화하는 방법을 사용하여 목표 함수의 파라미터를 구했다. 변위스펙트럼에서 그 값이 최대가 되는 $T_L \leq T \leq T_{L1}$ 에서의 값을 β_D 라고 하자. β_D 는 회귀분석에서 T_L 등과 같이 식별될 수 있고 동시에 변위설계스펙트럼도 구할 수 있다.

5. 분석 결과

5.1 V/H 비

각 지진기록의 수직스펙트럼의 값을 기하평균(GMRot150)으로 정의한 수평스펙트럼으로 나누어서 주기마다 비를 구하였다. 이때 감쇠비 $\xi = 5\%$ 이다.

$$V/H(T) = \frac{SA_v(T)}{SA_h(T)} \quad (6)$$

여기서 $SA_v(T)$ 는 주기 T에서 수직스펙트럼이고 $SA_h(T)$ 는 같은 주기에서 수평스펙트럼이다. 이리하며 각 지진기록마다 하나의 곡선이 얻어지고 모두 49개의 곡선이 구해진다. 이 곡선들을 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 11에

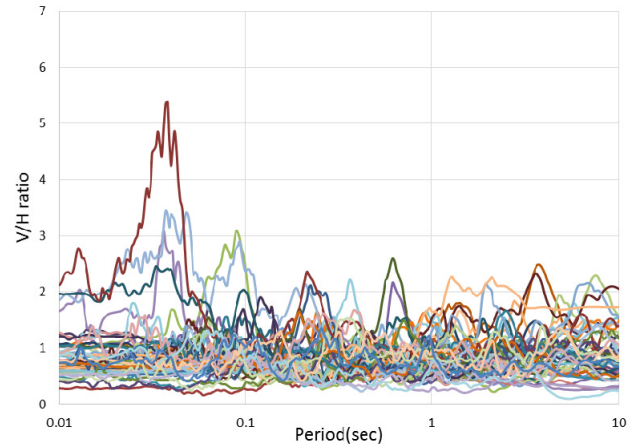


Fig. 10. V/H ratios of earthquake records both domestic and overseas

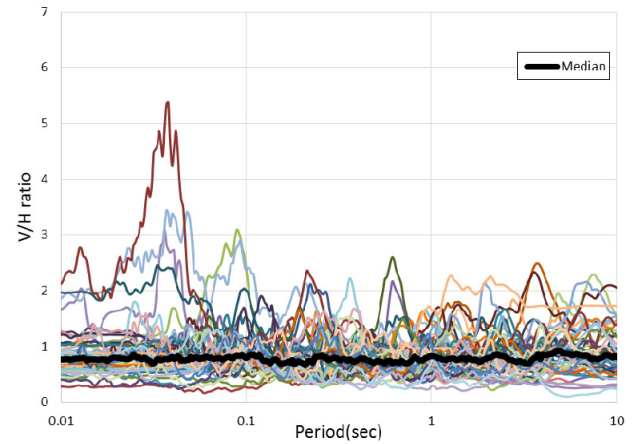


Fig. 11. The median value curve of V/H ratios

는 각 주기마다 중앙값을 계산하여 연결한 곡선이 주어져 있다.

Fig. 11에서 mean을 취하지 않고 median을 취한 이유는 $SA_v(T)$ 와 $SA_h(T)$ 가 대수정규분포를 갖고 따라서 $V/H(T)$ 도 대수정규분포 함수이기 때문이다. Fig. 11에서 우리는 중앙값 곡선이 주기 T에 따라서 변동의 폭이 아주 작고 거의 일정하다는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 수직스펙트럼과 수평스펙트럼의 형상이 유사할 것이라는 것을 시사한다고 하겠다.

일반적으로 수직성분 지진하중은 $PGA_v = 1.0 \text{ g}$ 에 정규화된 스펙트럼과 PGA_v / PGA_h 비로 규정된다. 이 비와 V/H 비는 다음 식에 의해서 주어진다.

$$\frac{PGA_v}{PGA_h} = V/H(0.01) = \frac{SA_v(0.01)}{SA_h(0.01)} \quad (7)$$

여기서 $T = 0.01$ 초로 가정한다. Fig. 11에서 $T = 0.01$ 초에서 V/H 비를 읽으면 $PGA_v / PGA_h = 0.77$ 으로 얻어지며 설계스펙트럼에서 주로 관심을 갖는 $T_L = 0.3$ 초까지 평균값 역시 0.77이다. 따라서 이는 넓은 범위의 주기에 걸쳐 상당히 합리적인 값을 알 수 있다. 이 값을 국내 및 국외 설계기준에서의 값과 Table 4에서 비교하였다.

Table 4. Comparison of the PGA_v / PGA_h ratios

	V/H Ratio	
	Short period	Long period
This Study	0.77	0.77
Eurocode 8(Type 1)	0.9	0.9
Eurocode 8(Type 2)	0.45	0.45
USNRC	1	2/3
ASCE 4-98	1	2/3
NEHRP	0.7	1/2

지금까지 우리나라에서 사용되어 왔던 2/3에 비해서 큰 값이지만 Eurocode 8에서의 0.9에 비하면 작은 편이다.

5.2 수직설계스펙트럼의 형상

국내의 49개 지진기록의 수직응답스펙트럼을 Fig. 12(a)에 도시하였다. 그림에 mean, mean + 1.0σ 스펙트럼도 함께 도시하였다. Fig. 12(b)에는 이 두 가지 스펙트럼만 별도로 도시하였다.

회귀분석을 실시하기 전에 표본의 적정성을 검증하였다. 즉 Type 3 오류가 발생하는지 Cross Validation 방법으로 확인하였다. 49개 지진 기록에서 각 데이터 1개씩을 제외한 48개 데이터로 구성된 49개의 표본을 작성

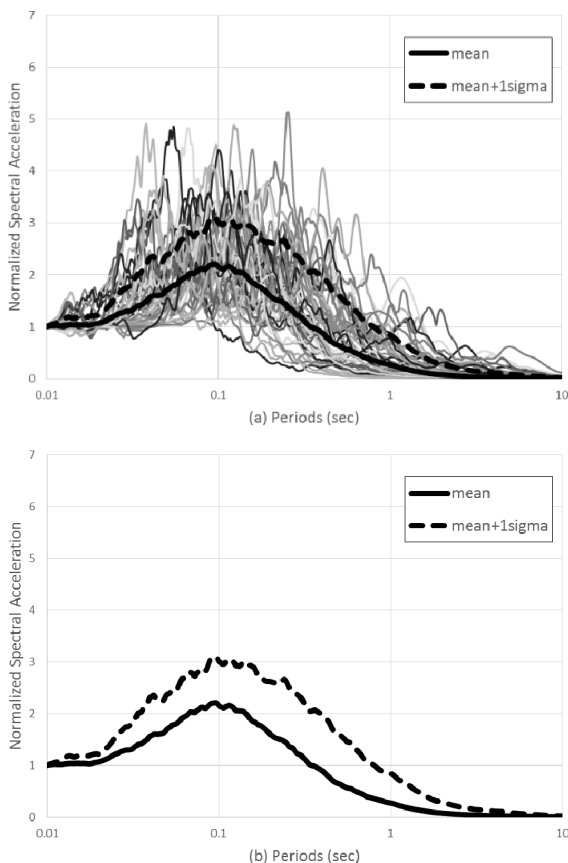


Fig. 12. Geometric mean spectra: (a) spectra for 49 records, (b) mean and mean + 1.0σ spectra

하였다. 이 49개의 표본의 각각에서 mean, mean + 1.0σ를 구하고 변동성을 조사하였고 그 결과를 Fig. 13(a), (b)에 각각 도시하였다. 이 결과들에서 표본에 따른 변동이 아주 작다는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 49개 지진 기록으로 구성된 표본이 적정하다는 것이 검증되었다고 하겠다.

두 가지 신뢰도에 대한 스펙트럼에 회귀분석을 실시하여 설계스펙트럼을 구하였다. 앞서 설명한 바와 같이 변위스펙트럼에서 T_L, T_{L1}, T_{L2} 를 식별하여 Fig. 14에 그 결과를 제시하였다.

mean 스펙트럼에서 $T_L = 3$ 초, $\beta_D = 0.0095s^2$, mean + 1.0σ 스펙트럼에서 $T_L = 3$ 초, $\beta_D = 0.056s^2$ 로 식별되었다. T_L 을 고정시키고 T_L 에서의 $SA(T_L) = (4\pi^2/T_L^2)SD(T_L) = (4\pi^2/T_L^2)\beta_D \times PGA$ 로 고정시킨 다음 가속도스펙트럼에 회귀분석을 실시하였다. 그 결과로 얻어진 설계스펙트럼과 전이주기 및 증폭계수를 Fig. 15에 제시하였다. Fig. 15에서 제시한 수직설계스펙트럼을 참고문헌[8]에서 제시한 수평설계스펙트럼의 형상과 Fig. 16에서 비교하였고 주요 파라미터를 Table 5에서 비교하였다.

가속도에 민감한 구간에서 수직스펙트럼의 최대증폭계수 α_v 의 값은 수평스펙트럼의 증폭계수에 비해서 약간 큰 값을 갖는다. 그러나 그 차는 1%보다도 작다. 그리고 전이주기는 실질적으로 같은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이 사실은 수평설계스펙트럼의 형상을 수직설계스펙트럼의 형상으로 사용할 수 있다는 것을 시사한다.

앞서 살펴본 외국의 수직설계스펙트럼은 대응하는 수평설계스펙트럼과 비교하여 단주기 영역으로 이동하고 가속도에 민감한 구간이 좁아지는

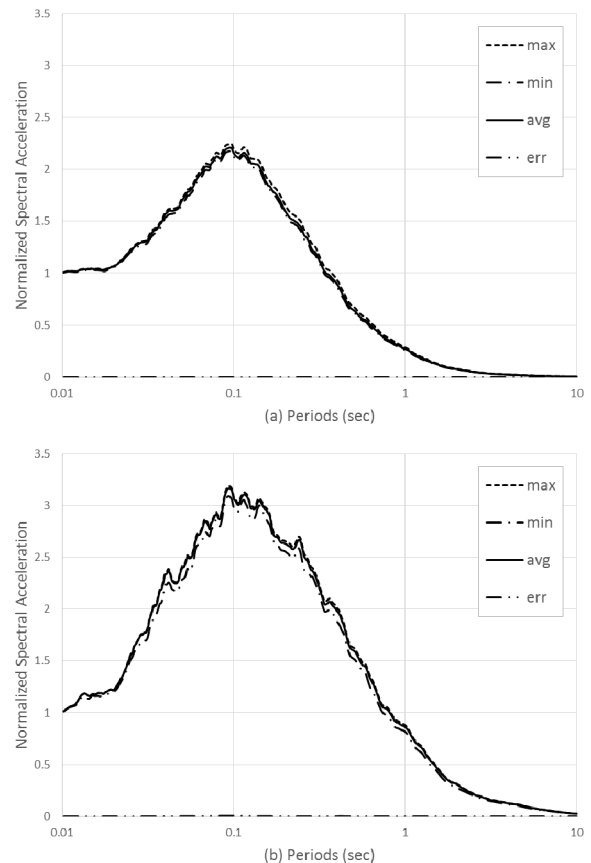


Fig. 13. Cross Validation results: (a) mean spectrum, (b) mean + 1.0σ spectrum

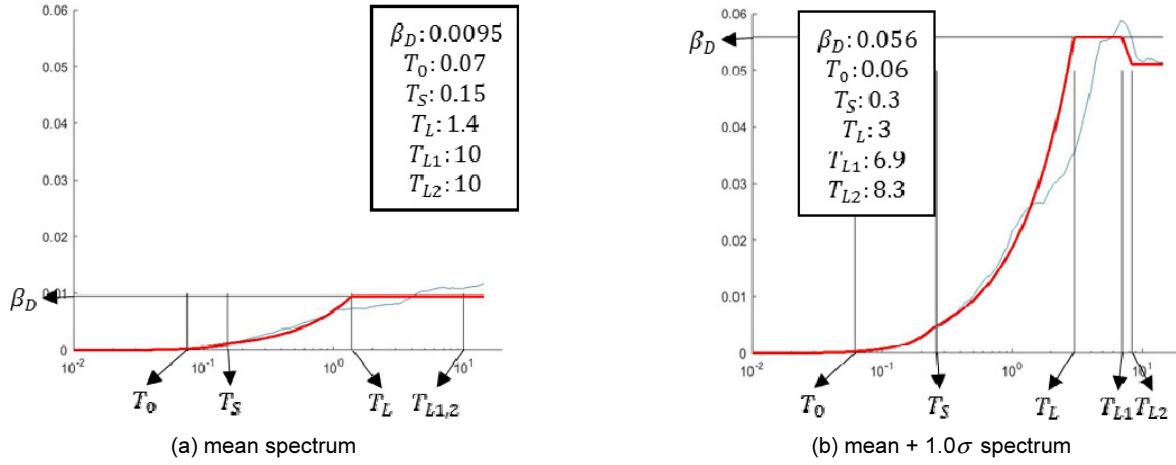


Fig. 14. Displacement spectra and their parameters: (a) mean spectrum, (b) mean + 1.0σ spectrum

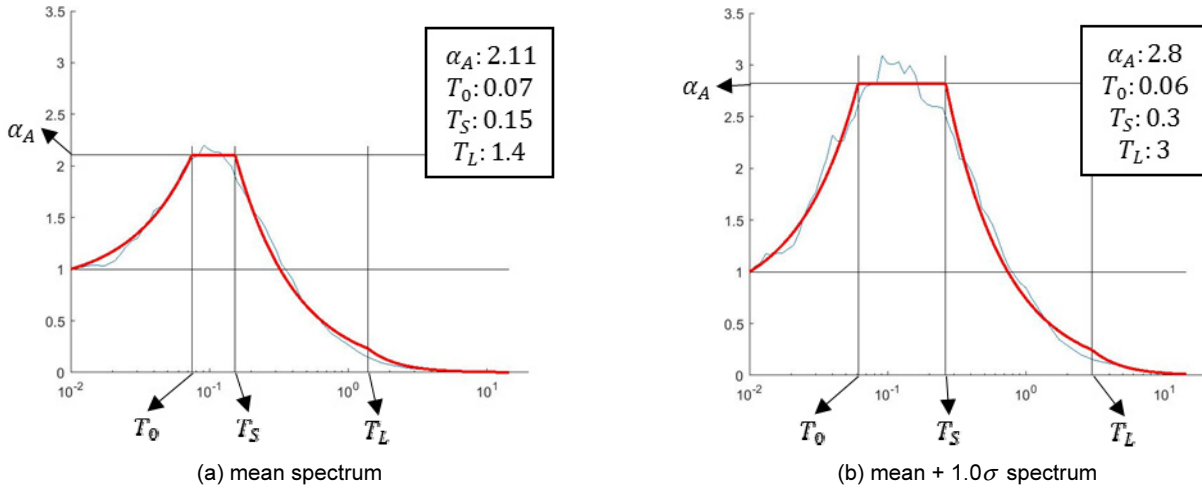


Fig. 15. Acceleration spectra and their parameters: (a) mean spectrum, (b) mean + 1.0σ spectrum

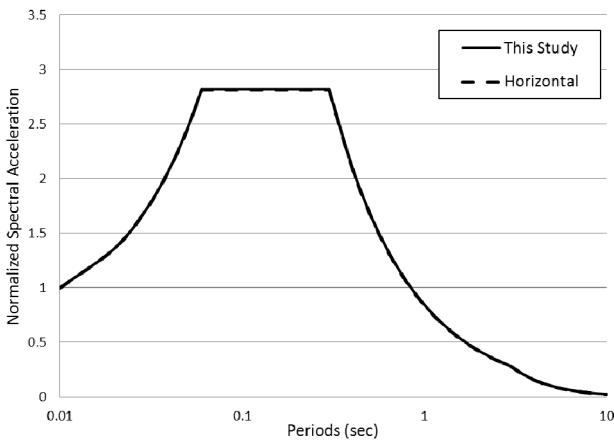


Fig. 16. Comparison between horizontal and vertical spectra

것을 보여주고 있다. 그런데 본 연구에서는 그렇지 않다는 결론이 도출되었다. 그 원인을 알아보기 위해서 국내지진 기록만 사용하여 얻은 수평/수직 스펙트럼과 국외지진기록만을 사용한 수평/수직 스펙트럼을 계산하여 비

Table 5. Comparison of amplification factor and other parameters

	Mean Spectrum				Mean + 1sigma Spectrum			
	α_A	T_0	T_S	T_L	α_A	T_0	T_S	T_L
Horizontal	2.0	0.07	0.18	1.2	2.8	0.06	0.3	3
This Study	2.11	0.07	0.15	1.4	2.8	0.06	0.3	3

교하였다. Fig. 17(a)에는 국외지진의 스펙트럼이, Fig. 17(b)에는 국내지진의 스펙트럼이 비교되어 있다.

국외지진의 경우에는 수직스펙트럼은 수평스펙트럼에 비해서 단주기로 이동하는 것을 Fig. 17(a)는 분명하게 보여주고 있다. 그런데 국내지진의 경우에는 수직스펙트럼의 전이주기가 수평스펙트럼의 전이주기와 거의 같다는 것을 Fig. 17(b)에서 알 수 있다. 즉, Fig. 17(b)는 국내지진의 특성이 외국지진과 다르다는 것을 시사한다. 다른 하나의 가능성은 국내지진의 규모는 대체로 5.0 정도인데 비해서 국외지진은 큰 지진도 포함되어 있다. 규모가 6.0보다 작은 국외 3개 지진의 기록에 의한 수직 및 수평 mean + 1.0σ 스펙트럼을 Fig. 18에서 비교하였다. 여기서 우리는 국외 지진의 경

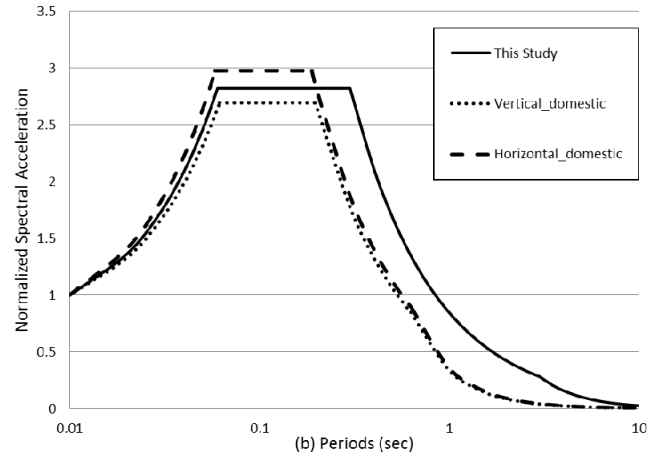
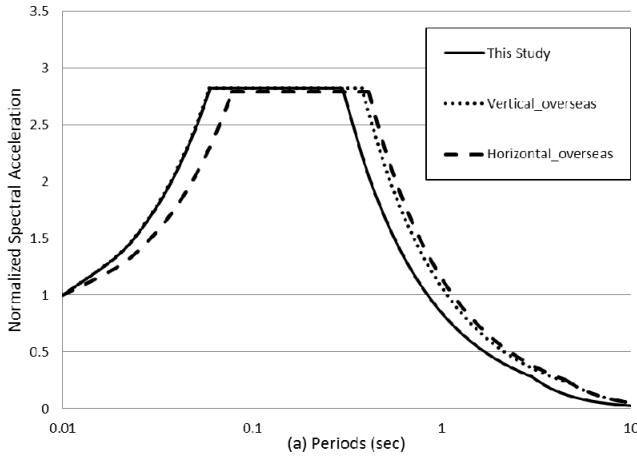


Fig. 17. Comparison of vertical spectrum with horizontal one: (a) Overseas earthquakes; (b) Domestic earthquakes

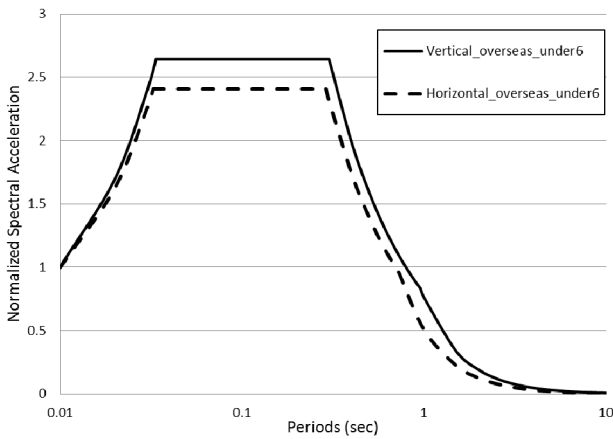


Fig. 18. Comparison of vertical spectrum with horizontal one for overseas earthquakes of magnitude less than 6.

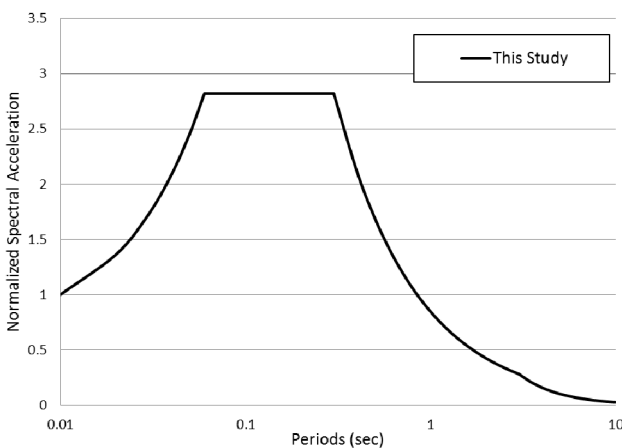


Fig. 19. Vertical design spectrum

Table 6. Parameters for vertical design spectrum

	α_A	Transition Period (second)		
		T_0	T_S	T_L
This Study	2.8	0.06	0.3	3

우에도 규모가 작으면 수직스펙트럼의 전이주기가 수평스펙트럼의 전이주기와 유사하다는 것을 볼 수 있다.

따라서 Fig. 18에서 수직스펙트럼의 형상이 수평스펙트럼의 형상과 거의 같게 도출된 것은 국내지진과 규모가 작은 국외지진의 영향이 크게 반영된 결과라는 것을 이해할 수 있다. 이러한 사실들은 본 연구에서 얻은 수직스펙트럼의 형상이 타당하다는 것을 보여주고 있다고 하겠다.

5.3 수직설계스펙트럼

5.1과 5.2절의 결과를 종합하면 수직성분 지진하중 즉 수직설계스펙트럼이 얻어진다. 지진계수는 수평지진가속도로 표현되므로 수직설계스펙트럼도 최대수평지진가속도 $PGA_h = 1.0 \text{ g}$ 에 대해서 정규화하였다. Fig. 19에는 수직설계스펙트럼을 도시하였고 Table 6에는 전이주기를 비롯한 파라미터들이 수록되어 있다.

6. 국내외 기준과의 비교

6.1 국외기준과의 비교

앞서 언급하였듯이 설계기준에서는 보수적으로 $\text{mean} + 1.0\sigma$ 스펙트럼을 채택하고 있다. 이 연구에서 얻은 스펙트럼을 USNRC 스펙트럼, NEHRP 스펙트럼 및 판내부 지역에 속하는 유럽의 설계스펙트럼과 비교하였다. Fig. 20에서 비교한 스펙트럼들은 최대수평지진가속도 $PGA_h = 1.0 \text{ g}$ 에 대해서 정규화하였다. Table 7에는 증폭계수와 전이주기가 비교되어 있다.

Fig. 20과 Table 7에서 Eurocode 8과 NEHRP 스펙트럼은 단주기 영역이 잘 발달되어 있고 USNRC 스펙트럼은 상대적으로 장주기 영역이 잘 발달되어 있는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 제시한 스펙트럼은 단주기 영역과 장주기 영역의 폭넓은 범위에 걸쳐서 발달되어 있는 것을 알 수 있다. 어떻게 보면 보수적인 결과라고 생각할 수 있다. 가속도스펙트럼의 최대값은 Eurocode 8과 USNRC 스펙트럼보다는 작고 NEHRP 스펙트럼보다는 크다는 것을 또한 알 수 있다.

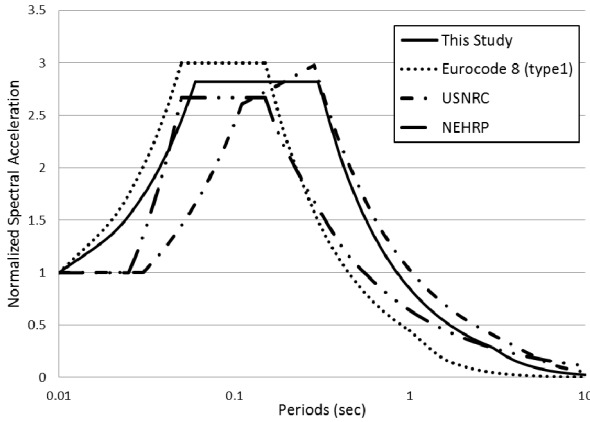


Fig. 20. Comparison of mean + 1.0σ spectrum with the design spectra for various overseas intra-plate regions

Table 7. Comparison of parameters of mean + 1.0σ spectrum with those of design spectra for various overseas intra-plate regions

	α_A	Transition Period (second)		
		T_0	T_S	T_L
This Study	2.8	0.06	0.3	3
Eurocode 8	3.0	0.05	0.15	1
USNRC	-	0.11	0.285	1
NEHRP	2.67	0.05	0.15	2

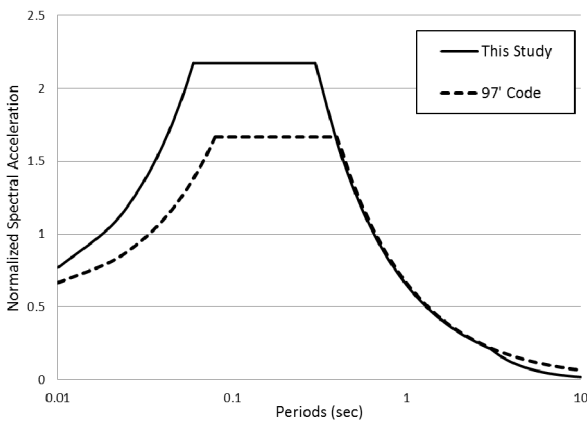


Fig. 21. Comparison of mean + 1.0σ spectrum with the design spectra for 1997 design code

Table 8. Comparison of parameters of mean + 1.0σ spectrum with those of the design spectra for 1997 design code

	$\alpha_A \times (V/Hratio)$	Transition Period (second)		
		T_0	T_S	T_L
This Study	$2.8 \times 0.77 = 2.16$	0.06	0.3	3
97' Code	$2.5 \times \frac{2}{3} = 1.667$	0.08	0.4	-

6.2 국내 기준과의 비교

본 연구 결과로 제시되는 수직설계스펙트럼과 기존 우리나라 내진설계 기준Ⅱ [1]의 설계스펙트럼의 형상을 Fig. 21에 그리고 증폭계수와 전이주기는 Table 8에 비교하였다. 내진설계기준Ⅱ [1]에서는 최대수직지반가속도는 최대수평지반가속도의 2/3로 취하도록 규정하고 있다. 두 가지 설계스펙트럼을 최대수평지반가속도 $PGA_h = 1.0 \text{ g}$ 에 대해서 정규화하였다.

Fig. 21과 Table 8는 가속도에 민감한 구간에서는 기존의 스펙트럼에 비해서 새로운 스펙트럼의 값이 대폭 증가하는 것을 보여주고 있다. 그러나 속도에 민감한 구간에서는 거의 값이 같고 변위에 민감한 구간에서는 오히려 새로운 스펙트럼이 작아지게 된다. 지진하중의 수직성분은 단주기 구조물보다는 장주기 구조물 특히 사강물이나 현수교와 같은 장대 교량에서 중요할 수 있다. 이러한 측면에서 본다면 본 연구에서 제시하는 수직설계스펙트럼은 상당히 합리적이라고 말할 수 있다.

7. 결론

국내의 판내부 지진기록에 근거하여 V/H 비와 수직설계스펙트럼을 구하였다. 규모 4.5 이상의 국내의 판내부 지진 기록 49개를 수집하여 통계 분석하였다. 비록 기록의 개수는 많지는 않지만 통계적으로 유의한 결과를 얻을 수 있었다.

V/H 비로부터 $PGA_v / PGA_h = 0.77$ 으로 얻어졌다. 스펙트럼 분석에서 가속도설계스펙트럼뿐 아니라 변위설계스펙트럼도 같이 얻어졌고 형상을 결정하는 파라미터도 회귀분석에 의해서 $\alpha_A = 2.8$, $T_0 = 0.06$ 초, $T_S = 0.3$ 초, $T_L = 3$ 초로 구해졌다. 이 결과들로부터 최대수평지반가속도 $PGA_h = 1.0$ 에 대해서 정규화된 수직설계스펙트럼을 제시하였다.

외국의 설계스펙트럼에 비교하여 새로 제시한 수직설계스펙트럼은 단주기에서 장주기 영역에 걸쳐서 잘 발달되어 있고 그렇기 때문에 보수적이라고 판단된다. 증폭계수도 외국의 기준에 비해서 비교적 합리적임을 확인하였다.

내진설계기준연구Ⅱ에 제시된 설계스펙트럼과 비교하였을 때 본 연구에서 제시한 설계스펙트럼을 적용한다면 주기가 0.39초보다 짧은 단주기 구조물의 경우에는 설계하중이 증가하고 주기가 0.39초보다 긴 장주기 구조물의 경우에는 설계하중이 감소하게 된다. 특히 전이주기 T_L 이 명확하게 제시되었기 때문에 변위에 민감한 영역에서 설계변위는 크게 감소할 것으로 예상된다.

서론에서 언급하였듯이 본 연구의 결과는 규모 4.5 이상의 국내 지진과국의 판내부 지진 기록을 사용하여 얻었다. 여러 가지 제약 조건으로 인해서 더 많은 수의 기록을 확보하지 못하였고 지진학적 관점에서 더 자세하게 분석하지는 못했다. 실제 지진기록을 이용한 우리나라 지진하중을 구하는 본격적인 연구는 이제 시작되었다고 해도 지나치지 않을 것이다. 앞으로 후속 연구를 통해서 본 연구의 한계를 극복하고 좀 더 완전한 결과가 제시되기를 기대한다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 ‘지진가속도 분석 등을 통한 설계지반운동 표시방법 고도화기술 개발’ [MPSS-자연-2013-71] 과제의 지원을 받아 수행한 연구입니다. 이에 감사드립니다. 특히 저자들은 연구의 주요 고비마다 해결의 실마리를 제공해준 그리스 Patras 대학교의 Apostolos S. Papageorgiou 교수께 큰 감사를 드리고, 구하기 어려운 판내부 지진 데이터를 흔쾌히 공유한 미국 Notre Dame 대학교의 George P. Mavroedis 교수께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

/ REFERENCES /

1. EESK, KICT, The Research of Seismic Design Code(II), Ministry of Construction and Transportation, c1997, 37 p.
2. Korea Road Association, Korean Highway Bridge Design Code(Limit state design) Cable Bridge part, Ministry of Construction and Transportation, c2014, p. 9-19.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants (Regulatory Guide 1,60), Washington, DC, USA, c2014.
4. Comité Européen de Normalisation, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, Comité Européen de Normalisation;c2004, 40 p.
5. BSSC, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750), 2009 Edition, Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency; c2009, 100 p.
6. McGuire RK, Seismic hazard and Risk Analysis, EERI Monograph MNO-10, Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute; c2004, 221 p.
7. Nakamura Y, Real-Time Information Systems for Hazard Mitigation, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico; 1996 Jun 23-28:Paper No, 2134, c1996.
8. Kim JK, Kim JH, Lee JH, Heo TM, Development of Korean standard horizontal design spectrum based on the domestic and overseas intra-plate earthquake records, Journal of Earthquake Engineering, 2016 Nov;20(6):369-378
9. Hartzell SH, Earthquake Aftershocks as Green's Functions, Geophysical Research Letters, 1978 Jan;5(1):1-4.

10. Kamae K, Irikura K, Pitarka A, A Technique for Simulating Strong Ground Motion Using Hybrid Green's Functions, Bulletin of the Seismological Society of America, 1998 Apr;88(2):357-367.
11. Mueller CS, Source Pulse Enhancement by Deconvolution of an Empirical Green's Function, Geophysical Research Letters, 1985 Jan;12(1):33-36.
12. Kanamori H, A Semi-Empirical Approach to Prediction of Long-Period Ground Motions from Great Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, 1979 Dec;69(6): 1645-1668.
13. Irikura K, Semi-empirical Estimation of Strong Ground Motions During Large Earthquakes, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ, 1983 Jun;33-2(298):63-104.
14. Imagawa K, Mikami N, Mikumo T, Analytical and Semi-Empirical Synthesis of Near-Field Seismic Waveforms for Investigating the Rupture Mechanism of Major Earthquakes, J. Phys. Earth, 1984 Aug;32:317-38.
15. Mikumo T, Miyatake T, Numerical Modeling of Realistic Fault Rupture Processes, Chapter 3 in Seismic Strong Motion Synthetics Edited by B.A. BOLT, ACADEMIC PRESS, INC; c1987.
16. Boore DM, Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, 1983 Dec;73(6A): 1865-1894.
17. Boore DM, Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, Pure and Applied Geophysics, 2003;160:635-676.
18. Jo ND, Baag CE, Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea, Earthquake Engineering Society of Korea, 2001 Aug;5(4):17-26.
19. Jo ND, Baag CE, Estimation of Spectrum Decay Parameter κ and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea, 2003 Dec;7(6):59-70.
20. Junn JG, Jo ND, Baag CE, Stochastic prediction of ground motions in southern Korea, Geosciences Journal, 2002 Sep;6(3):203-214.
21. American Society of Civil Engineers (ASCE), Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98; c1999, Chapter 2; p. 6.
22. KMA, Domestic Earthquake List, http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp
23. Davenport WB Jr, Probability and random processes: an introduction for applied scientists and engineers, New York: McGraw-Hill; c1970, 542 p.